

# БАГАТОДРОТОВЕ ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ СТАЛЕЙ ПІД ФЛЮСОМ

S. Gook<sup>1</sup>, B. El-Sari<sup>1</sup>, M. Biegler<sup>1</sup>, M. Rethmeier<sup>1</sup>, F. Lichtenthäler<sup>2</sup>, M. Stark<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology, Pascalstrasse 8 – 9, 10587, Berlin, Germany.

E-mail: sergej.gook@ipk.fraunhofer.de

<sup>2</sup>SMS group GmbH, Hirtenwiese 4, 57578, Elkenroth Germany.

Забезпечення необхідних механіко-технологічних властивостей зварних швів є критичним питанням при застосуванні багатодровових процесів дугового зварювання під флюсом високоміцних дрібнозернистих сталей. Надмірне введення тепла є однією з головних причин появи мікроструктурних зон із погіршеними механічними властивостями зварного з'єднання, такими як знижена ударна в'язкість та нижча міцність конструкції. Запропоновано варіант процесу, який зменшує об'єм зварювання, а також тепловіддачу за рахунок регулювання конфігурації зварювального дроту, а також енергетичних параметрів дуги, зберігаючи при цьому переваги багатодровового зварювання під флюсом, такі як висока стабільність процесу та продуктивність. Бібліогр. 16, рис. 6.

*Ключові слова:* дугове зварювання під флюсом, високоміцні дрібнозернисті сталі, механічні властивості з'єднань, енергетичні параметри дуги

**Вступ.** Зварювання під флюсом (SAW) дротяними електродами має широке застосування у виробництві численних вузлів різних галузей, таких як виробництво труб великого діаметра, нафтогазова промисловість, суднобудування, нафтохімічна промисловість, гідроелектростанції та морська вітрова енергія. Завдяки високій швидкості плавлення в цьому процесі можна досягти безперервного виробництва з високою економічною ефективністю. Для сортаменту сталі товщиною до 10 мм достатньо однопрохідного SAW. Деталі з більшою товщиною вимагають підвищеної швидкості плавлення, що може бути досягнуто шляхом застосування декількох дротяних електродів [1]. Особливо успішними виявилися багатодровові SAW-процеси з використанням до п'яти дротяних електродів [2].

Однак застосування таких високоефективних варіантів процесу SAW на сучасних високоміцних сталях (межа плинності вище 355 МПа) є складним через надмірне введення тепла через великий об'єм рідкої зварювальної ванни [3] і пов'язане з цим розміщенням на окремих ділянках зони теплового впливу (ЗТВ) [4]. Ці ділянки страждають від зниження в'язкості, а також від зниження міцнісних властивостей зварного з'єднання [5, 6]. Зокрема, ця проблема стосується високоміцних, термомеханічно оброблених дрібнозернистих сталей, високі механіко-технологічні властивості яких досягаються за допомогою спеціально налаштованого процесу термомеханічної прокатки. Дрібнозерниста мікроструктура цих сталей може незворотно руйнуватися в ЗТВ, так що ширина зони розміщення істотно залежить від використаного процесу зварювання та питомої енергії [7, 8].

Для порівняння, однопровідний процес SAW має типову швидкість плавлення близько 8 кг/год, тоді як п'ятипровідний SAW процес може досягти швидкості плавлення 90 кг/год [2, 9]. Питоме тепловкладення для обох варіантів процесу становить приблизно 2,5 та 10 кДж/мм відповідно. У DIN EN 10225:2009 [10] рекомендована номінальна енергія на одиницю довжини  $3,5 \pm 0,2$  кДж/мм для виробів з дрібнозернистої конструкційної сталі для стаціонарних морських споруд. Однак максимально допустима енергія тепловкладання може становити  $5 \pm 0,2$  кДж/мм, якщо вимоги до матеріалу не відповідають  $3,5 \pm 0,2$  кДж/мм. При виробництві труб великого діаметра для нафтогазової промисловості збільшення товщини стінки труби понад 21 мм призводить до збільшення тепловведення понад 5 кДж/мм під час зварювання, що призводить до сильного перегріву та повільного охолодження металу в ЗТВ. Таким чином, зазначена тепловіддача для п'ятипровідного процесу SAW значно перевищує рекомендовані значення.

Наведені параметри процесу зварювання, а також вимоги стандарту вказують на суперечність застосування багатодровового процесу SAW. Ця суперечність пояснюється тим, що, з одного боку, багатодровове зварювання під флюсом є надзвичайно цікавим для металообробної промисловості через свою економічність. З іншого боку, через його технологічні властивості використання цього процесу призводить до того, що негативно впливає на механіко-технологічні показники зварних з'єднань.

Метою даної роботи є дослідження технологічних меж п'ятидротового зварювання під флюсом щодо максимальної швидкості зварювання,

глибини проплавлення та тепловведення за допомогою випробувань зварювання товстостінних труб. Крім того, повинні бути показані можливості зменшення введення тепла шляхом регулювання конфігурації процесу.

**Зварювальне обладнання та матеріали.** Зварювальні експерименти проводилися на повномасштабній промисловій зварювальній системі (SMS group GmbH) для поздовжньої п'ятидротяної SAW на трубах великого діаметра. Дуги живляться від п'яти джерел струму з електронним керуванням типу PERFECTarc® 1500 AC/DC (SMS group GmbH) із сумарним струмом до 7500 А. Отримані переваги не обмежуються високою швидкістю плавлення та швидкістю зварювання. Завдяки програмованій формі сигналу для струму та напруги результат зварювання можна моделювати з урахуванням різних факторів (наприклад, геометрії зварного шва) [11]. До системи можна пристосовувати як плоскі екземпляри довжиною 2 м, так і великі труби довжиною до 6 м. Транспортну каретку з виробом, що зварюється, можна переміщати зі швидкістю до 6 м/хв. П'ятипровідна система SAW з двома різними геометріями зразків показана на рис. 1.

У проведених зварювальних випробуваннях були використані відрізки труб з трубопровідної сталі марки X70 за API 5L або L485MB за DIN

EN 10208-2 (матеріал № 1.8977). Використаними зварювальними матеріалами були суцільний дріт BA S2Mo згідно EN ISO 14171-A (EN 756) та агломерований зварювальний флюс типу BF 5.1 на основі алюмінату.

**Методика експерименту та результати.** Випробування зварювання проводилося на шестиметрових ділянках труб із зовнішнім діаметром 914,4 мм (36") і товщиною стінки 39 мм методом зварювання під флюсом з п'яти дротів. Використані труби являли собою поздовжньо зварені ділянки труб, які були забезпечені прихваткою, а також внутрішнім шаром. Тому досліджувані зварні шви були виконані як зовнішні зварні шви в V-подібному з'єднанні глибиною 15 мм з кутом розкриття 70°. За цільову була встановлена швидкість зварювання  $\geq 1$  м/хв, яка відповідала б для даної підготовки кромки. Розрахунок об'єму зварного шва, що підлягає заповненню, показав, що для забезпечення замкнутого профілю зварного шва необхідно досягти швидкості плавлення не менше 72 кг/год. Крім того, була визначена глибина проплавлення зварного шва щонайменше 22 мм, щоб розплавити існуючий прихватний шов (GMA) і гарантувати надійне з'єднання між зовнішнім шаром і раніше нанесеним внутрішнім шаром.

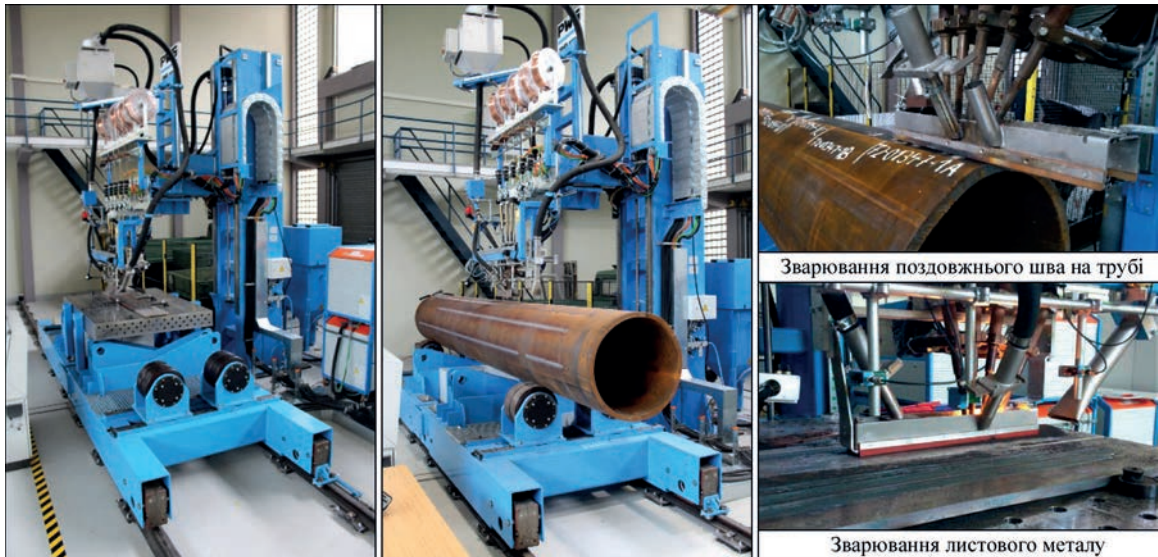


Рис. 1. П'ятидротяний стенд для зварювання листів і труб у Fraunhofer IPK у Берліні

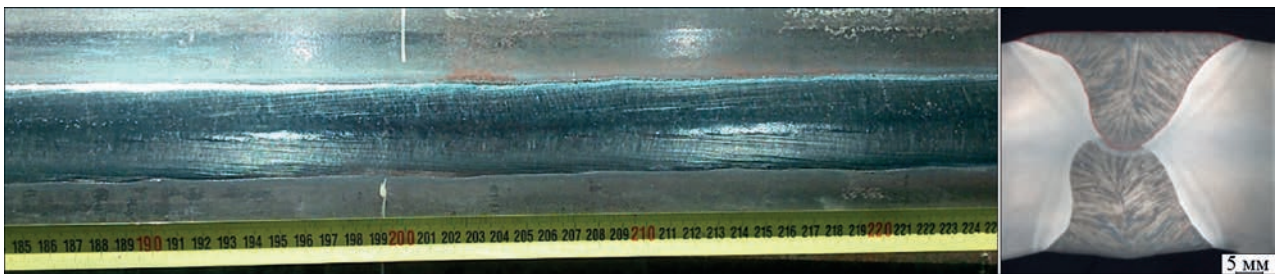


Рис. 2. Зовнішній вигляд і поперечний переріз зварного шва SAW. Зовнішній шар зварений з такою конфігурацією дроту:  $d_{1,2} = 4,8$  мм і  $d_{3,4,5} = 4$  мм;  $V = 1,1$  м/хв,  $I_1 = 1480$  А,  $U_1 = 34$  В;  $I_2 = 1200$  А,  $U_2 = 38$  В;  $I_3 = 760$  А,  $U_3 = 38$  В;  $I_4 = 650$  А,  $U_4 = 38$  В;  $I_5 = 650$  А,  $U_5 = 38$  В

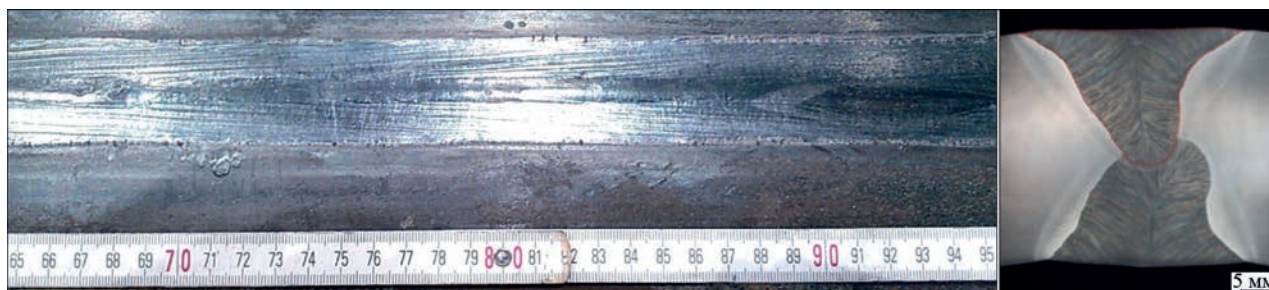


Рис. 3. Зовнішній вигляд і поперечний переріз зварного шва SAW. Зовнішній шар зварений з такою конфігурацією дроту:  $d_1 = 3,2$  мм і  $d_{2,3,4,5} = 4$  мм;  $V = 1,2$  м/хв,  $I_1 = 1200$  А,  $U_1 = 32$  В;  $I_2 = 1150$  А,  $U_2 = 36$  В;  $I_3 = 780$  А,  $U_3 = 42$  В;  $I_4 = 760$  А,  $U_4 = 44$  В;  $I_5 = 760$  А,  $U_5 = 44$  В

Серія зварних швів була виконана за традиційною для промислової практики конфігурацією дроту, при цьому перші два пальники були оснащені дротом 4,8 мм, а третій, четвертий і п'ятий дроти мали діаметр 4 мм. У другому експерименті на першій дузі використовували дротяний електрод діаметром 3,2 мм. Наступні чотири дроти мали діаметр 4 мм. Зовнішній вигляд зварного шва, металографічні перерізи та параметри зварювання для обох варіантів процесу показані на рис. 2 і 3.

Система управління джерелами зварювального струму дозволила записувати всі відповідні технологічні дані, такі як зварювальний струм, напруга, швидкість зварювання та подачі дроту під час зварювання з частотою дискретизації 50 Гц і використовувати їх для подальшого аналізу процесу зварювання. Записані дані процесу зварювання наведені як приклад на рис. 4.

Плавний прогрес сигналів зварювального струму та напруги для всіх п'яти проводів свідчить про стабільність процесу зварювання. Фактична швидкість плавлення зварювальних процесів може бути визначена з записаних швидкостей подачі дроту.

Оцінка результатів показала, що процес зварювання в конфігурації, представленій на рис. 2,

можна виконувати зі швидкістю зварювання 1,1 м/хв для досягнення швидкості плавлення 83 кг/год. Таким чином, V-подібне з'єднання було повністю заповнено. На швах виявлена невелика увігнутість верхнього бортика 0,7 мм. При глибині зварювання 20,5 мм можна було отримати наскрізний зварний шов, щоб переріз шва був повністю закритий. Однак досягнуту глибину зварювання слід розглядати як граничну, оскільки внутрішній шар можна було досягти не завжди. Варіант процесу з провідником 3,2 мм демонструє інший результат (див. рис. 3). Тут була досягнута більша глибина проплавлення зварного шва 24,5 мм, ніж у конфігурації процесу з провідним дротом 4,8 мм. Завдяки більшій глибині проплавлення зварний шов мав більш тонкий профіль, що призвело до зменшення поперечного перерізу зварного шва з 425,8 до 379,8 мм<sup>2</sup> (на 10,8 %). Швидкість зварювання можна було збільшити до 1,2 м/хв, що дозволило отримати плоский зварний шов без увігнутості. Енергія тепловкладання знизилася до 9,1 кДж/мм (на 4,2 %).

Температурні цикли під час зварювання вимірювали термопарами (К). Оскільки ширина зварного шва становила близько 40 мм, термопари розміщували на відстані близько 20 мм від центру V-подіб-

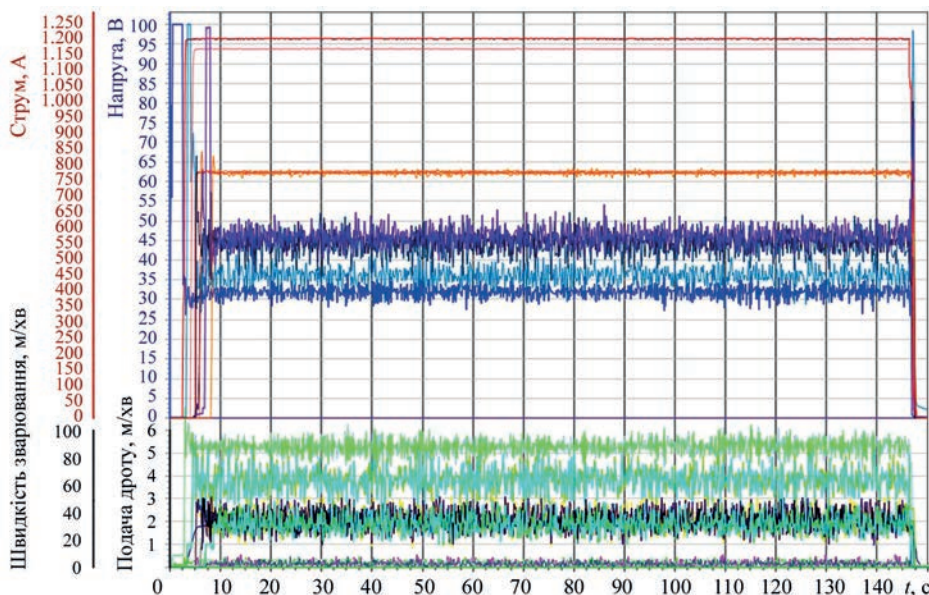


Рис. 4. Записані технологічні дані під час зварювання товстостінної труби з п'яти дротів

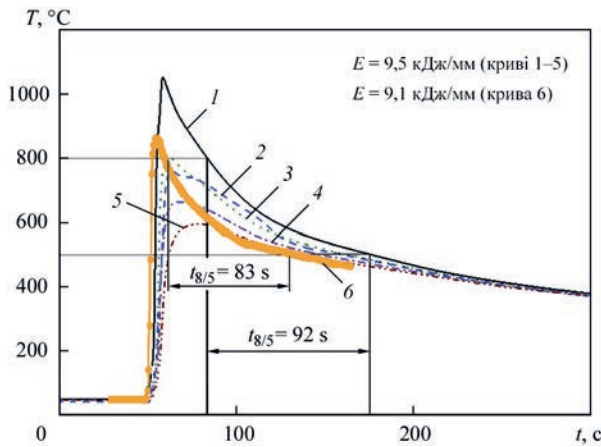


Рис. 5. Температурні цикли зварювання для п'ятидротового зварювання ( $E = 9,5$  та  $E = 9,1$  кДж/мм, зовнішній шов, товщина стінки труби 39 мм)

ного з'єднання. Таким чином, було можливим записати час  $t_{8/5}$  в зоні з'єднання, в безпосередній близькості від лінії з'єднання. Результати вимірювання температури для двох варіантів процесу можна побачити на рис. 5. Тепловкладання 9,5 кДж/мм привело до часу  $t_{8/5}$ , дорівнюючим 92 с. Для варіанту процесу з енергією 9,1 кДж/мм час  $t_{8/5}$  зменшився до 83 с. Відповідні швидкості охолодження становлять 3,2 та 3,6 °C/с. Однак якщо розглянути рекомендації щодо швидкості охолодження для поздовжнього зварювання під флюсом труб великого діаметра, то виявимо, що вона повинна бути в діапазоні від 10 до 60 °C/с [12–15].

Розглянуті тут значення далекі від рекомендованих швидкостей охолодження. Негативний вплив занадто високих енергій тепловкладання на пластичні властивості ЗТВ продемонстрували випробування на твердість. Використовуючи тест на твердість ( $HV1$ ), було виявлено (рис. 6), що зварні шви, отримані при 9,5 кДж/мм, мали відносно велике падіння твердості ЗТВ (0,79 від твердості основного металу). При зварюванні з лінійною енергією 9,1 кДж/мм зварні шви мають менше падіння твердості в ЗТВ (0,91 від твердості основного ме-

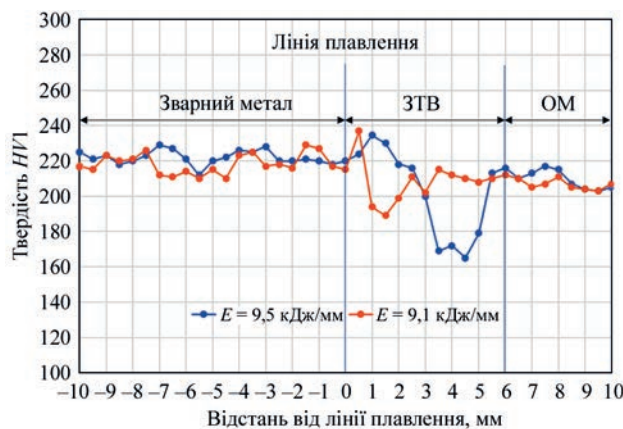


Рис. 6. Профіль твердості  $HV1$  у зварному шві при п'ятидротовому зварюванні САВ ( $E = 9,5$  та  $9,1$  кДж/мм, зовнішній шов, товщина стінки труби 39 мм)

талу), але це може означати втрату міцності приблизно на 10 %.

Для обох розглянутих варіантів процесу можна помітити, що енергія на одиницю довжини для п'ятидротової САВ є занадто високою і її необхідно знижувати далі, щоб уникнути утворення несприятливих мікроструктур і зниження пластичних властивостей у ЗТВ.

**Обговорення.** У багатодротовій САВ зазвичай на перший дріт подається позитивний постійний струм, щоб досягти максимальної глибини проплавлення зварного шва. Наступні дроти живляться змінним струмом зі зсувом фази на 90°, щоб мінімізувати взаємні ефекти магнітного дуття. У розглянутих тут варіантах процесу струм першого дроту 4,8 мм становив 1480 А і був на верхній межі потужності джерела струму. Щільність струму на кінці дроту досягала 98 А/мм<sup>2</sup>, що є типовим значенням для САВ із суцільним дротяним електродом. У другому варіанті процесу на першій дузі використовували дротяний електрод діаметром 3,2 мм. Завдяки значно вищій щільності струму на кінці дроту 3,2 мм, що становить 125 А/мм<sup>2</sup>, можна було досягти глибини проплавлення зварного шва приблизно на 20 % більше, ніж у конфігурації процесу з дротом 4,8 мм попереду.

На основі цього ефекту можна запропонувати технологічну рекомендацію для багатодротової САВ при зварюванні термочутливих дрібнозернистих сталей. В основному, щоб досягти меншого введення тепла, підготовку кромки необхідно відповідно змінити. Це означає, що кут розкриття з'єднання необхідно зменшити, щоб з'єднання було надійно заповнене при заданих параметрах зварювання. Таким чином, кількість присадного металу, необхідного для заповнення V-подібного з'єднання, зменшується, і введення тепла при багатодротовому зварюванні під флюсом може бути знижено. Отже, енергія тепловкладання не перевищує задану межу. Зменшуючи таким чином тепловіддачу під час САВ товстостінних труб, можна досягти швидкості охолодження до 10 °C/с і вище [16]. Для зварювання зовнішнього шару на трубі з товщиною стінки 39 мм це означає, що кут розкриття V-образного з'єднання необхідно зменшити з 70 до 60°, а глибину V-подібної канавки – на один міліметр від 15 до 14 мм. Необхідна швидкість плавлення при швидкості зварювання 1,2 м/хв буде приблизно 67 кг/год, а енергія лінійного тепловкладання 6,5 кДж/мм.

Порівняння форми внутрішнього шва показує, що зварний шов з більш товстим провідним дротом має напівкруглу лінію сплавлення, більш вигідну форму, ніж шов з тоншим дротом 3,2 мм попереду (див. рис. 2 та рис. 3). Ширина шва співвідноситься з глибиною шва як 1:1 для шва з дро-

том 4,8 мм попереду. Для тоншого провідного дроту це співвідношення має несприятливе значення  $\leq 1$ , оскільки шов занадто глибокий. Тут слід зазначити, що зварний шов з дротом 3,2 мм попереду не має паралельних боків або ліній розплаву, що вказує на несприятливий фронт кристалізації. Зварний шов скоріше трикутної або фальцевої форми. Можна помітити, що кристалізація відбувається перпендикулярно лінії плавлення, а кристали орієнтовані до верхньої області зварного шва, тобто до області зварного шва, де виникають найменші механічні напруження через термоусадку. З цієї точки зору критерій «відношення ширини до глибини» необхідно розглядати критично, особливо для зварних швів, де не можна спостерігати класичних напівкруглих або майже прямих ліній сплавлення.

Ще одна перевага технологічного варіанту з більш тонким провідним дротом, яку не слід недооцінювати, полягає в тому, що площа розплавленого перерізу зварного шва становить приблизно на 10 % менше, ніж у варіанті з дротом 4,8 мм. Ця перевага виражається в тому, що при меншому перерізі зварного шва змішування присадного металу з основним також нижче. З практики відомо, що високий ступінь змішування несприятливий для високоміцних сортів, тому його необхідно підтримувати якомога нижчим.

## Висновки

Сучасні багатодротові технології SAW при зварюванні товстостінних труб із високоміцних дрібнозернистих сталей характеризуються високою енергією процесу до 9,5 кДж/мм і, таким чином, не забезпечують швидкість охолодження в ЗТВ у межах рекомендованого діапазону 10...60 °C/c. Це обмежує застосування багатодротового зварювання під флюсом у виробництві труб, особливо при обробці сталей вищих класів міцності X70 і вище відповідно до API 5L.

На основі зварювальних випробувань п'ятидротовим методом SAW на трубі з товщиною стінки 39 мм було показано, що при зменшенні діаметра провідного (на постійному струмі) зварювального дроту глибина проплавлення дуги, а отже, і глибина проникнення зварного шва збільшується на 20 % порівняно зі звичайною конфігурацією зварювального дроту. Зварний шов стає тоншим і має профіль проплавлення зварного шва у формі галтели.

На основі цього ефекту запропоновано технологічну рекомендацію для мінімізації енергії лінії та збільшення швидкості охолодження в зоні ЗТВ. Зменшення кута розкриття V-подібного з'єднання в поєднанні зі зменшенням глибини V-по-

дібної канавки призведе до зменшення поперечного перерізу зварного шва. Необхідна кількість наповнювача зменшується і енергія процесу зменшується. За допомогою цієї конфігурації процесу також можна перейти до чотирьохпровідного процесу зварювання UP, оскільки використання п'ятого дроту більше не є необхідним через знижену швидкість осадження.

## Список літератури

1. Brensing, K. H., Sommer, B. Herstellverfahren für Stahlrohre. *Salzgitter Großrohre GmbH*, www.wv-stahlrohre.de/fileadmin/pdf/Stahlrohre\_Herstellverfahren.pdf
2. DVS Merkblatt 0915 (02/2000) Unterpulver-Mehrdrahtschweißen
3. Moeinifar, S., Kokabi, A.H., Hosseini, H.M. (2011) Role of tandem submerged arc welding thermal cycles on properties of the heat affected zone in X80 microalloyed pipe line steel. *Journal of materials processing technology*, 211(3), 368–375.
4. Hochhauser, D.I.F., Rauch, M.R. (2012) Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels. *Welding in the World*, 56(5-6), 77–85.
5. Maurer, W., Ernst, W., Rauch, R. et al. (2013) Einfluss der Weichen Zone auf die mechanischen Eigenschaften hochfester Schweißverbindungen. *Schweiss- & Prüftechnik*, 10–15.
6. Bang, K.S., Kim, W.Y. (2002) Estimation and prediction of HAZ softening in thermomechanically controlled-rolled and accelerated-cooled steel. *Welding Journal-New York*, 81(8), 174–S.
7. Sirin, K., Sirin, S.Y., Kaluc, E. (2016) Influence of the interpass temperature on t8/5 and the mechanical properties of submerged arc welded pipe. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 152–159.
8. Viano, D.M., Ahmed, N.U., Schumann, G.O. (2000) Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments. *Science and technology of welding and joining*, 5(1), 26–34.
9. Aichele, G. (1994) *Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden*. Fachbuchreihe Schweißtechnik. DVS-Verlag GmbH Düsseldorf.
10. Norm DIN EN 10225:2009-10. *Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen – Technische Lieferbedingungen*; Deutsche Fassung EN 10225:2009
11. Wietrzniok, H., Lichtenthäler, F. (2014) Moderne Großrohrfertigung – Neue Hochleistungs-Schweißstromquelle für alle Lichtbogenschweißverfahren. *DVS Berichte*, 306, 19–25, DVS-Verlag, Düsseldorf 2014
12. Hulka, K. (2005) The role of niobium in low carbon Bainitic HSLA Steel. *Proceedings of the 1st international conference on super-high strength steels. Rome, Italy, November 2005*.
13. Knoop, F.M., Bremer S., Flaxa V. et al. (2011) The processing of helical-welded large diameter pipes of grade X80 with 23,7 mm wall thickness and their properties. *Proceedings of international seminar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November, 209–229*.
14. Frantov, I., Permyakov, I., Bortsov, A. (2011) Improved weldability and criterion for reliability of high strength pipes steels. *Proceedings of international semi-nar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November, 247–260*.
15. Chengia, Shang, Xiaoxiang, Wang, Quingyou, Liu, Janyan, Fu. (2011) Weldability of higher niobium X80 pipeline steel. *Proceedings of international seminar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November, 435–453*.
16. Khudyakov, A.O., Korobov Yu.S., Danilkin P.A., Kvashnin V.D. (2019) Finite element analysis of heat distribution for multiple-electrode submerged arc welding of high-strength pipe steels. *13th Int. Conf. on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM-13). Melbourne, Australia, 190–197*.

Надійшла до редакції 23.12.2021